XiO: Motorized Wedge の MU 計算

本資料にて XiO での Motorized Wedge を使った計画においての MU 算出方法について説明します。

【参考資料】
Elekta 治療機の「取扱説明書-クリニカルモード」
「XiO Inside」

【Motorized Wedge とは】
エレクタ治療機は物理ウェッジ（≒60 度）が内装されています。任意の角度のウェッジフィールドの線量分布はオープンと物理ウェッジの線量分布の合成になります(図 1)。それぞれの照射量（MU）の比率を変えることで任意の角度の線量分布を実現します。

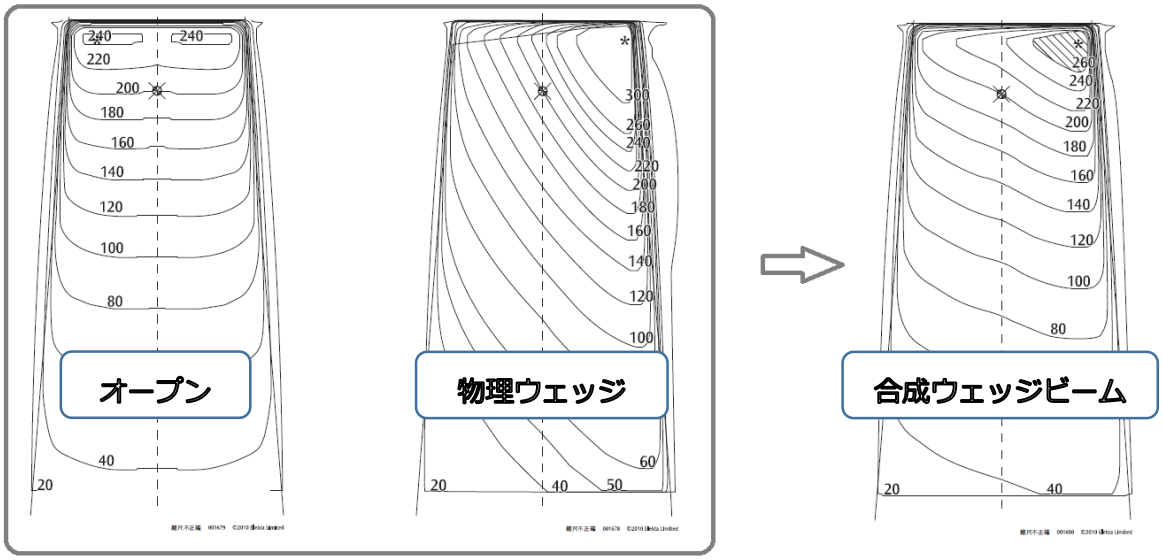


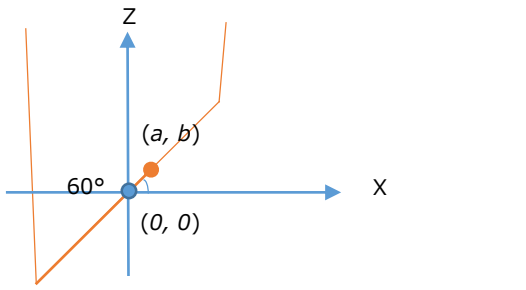
図1：Motorized Wedge概念図：等線量曲線[1]

ウェッジ角度の定義は以下のとおりです。
「ウェッジ角度は、水ファントムの深度 10 cm での、ウェッジビームの等線量線とビームの中心軸に対する法線とで形成される角度です [1]」

[1] 「Agility および Integrity™ R3.0 取扱説明書クリニカルモード」より抜粋

【XiO での Motorized Wedge の MU 計算について】
以上のセクションで Motorized Wedge の概念を明確にしたところ、XiO での任意の角度においての MU 計算方法について考えます。

1．合成角度と線量比の関係
合成角度 θ はオープンとウェッジの線量合成の結果から得られます。例えば、図 2 のように 60 度ウェッジの *XZ* 平面上の等線量曲線を例にとって説明します。



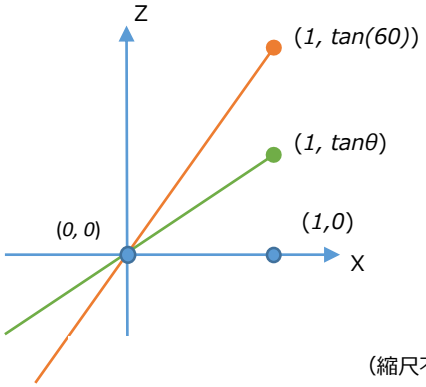
(縮尺不正確)

図 2：ウェッジ 60 度の等線量曲線

とある座標（図 2 では（0,0）と設定）と同じ線量になっている座標(a,b)があったとします。これらを結ぶ直線は以下の式で表せます。

$$Z(X)_{\theta=60} = \left(\frac{b}{a}\right) \cdot X = \tan 60 \cdot X$$

他方、オープンの等線量曲線を直線で表すと $Z(X)_{\theta=0}=\tan 0 \cdot X$、つまり $Z(X)_{\theta=0}=0$ です。X＝1 の時の各ウェッジ角度、θ の座標は図 3 のようになります。



（縮尺不正確）

図 3：等線量の概念図、X=1 の 3 つのポイントは物理ウェッジ（60°、オレンジ）、物理ウェッジ+オープン（θ、緑）、オープン（0°、青）の等線量ポイントを示しています。

これらの座標は同じ線量の位置を示しています。物理ウェッジとオープンを合成した場合の線量はどうなるでしょうか。合成時のトータル線量を $D_{open}+D_{wedge}$ とします。トータル線量に対するウェッジ線量 D_{wedge} の割合から tan60 と tan0 の点の間に新しい等線量点(1, tanθ)が決まります。(図 4)

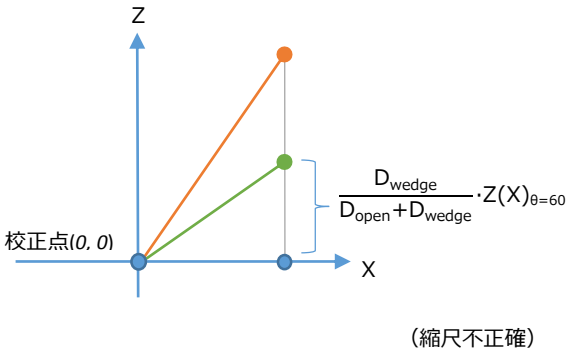


図 4：線量比とウェッジ角度の関係

$Z(X)_{\theta=0}=0$ なので、

$$Z(X)_{\theta}=\left(\frac{D_{wedge}}{D_{open}+D_{wedge}}\right)\cdot Z(X)_{\theta=60}$$

の関係になります。ここで$\{D_{wedge} / (D_{open} + D_{wedge})\}$を g_{θ} と置けば、

$$Z(X)_{\theta}=g_{\theta}\cdot Z(X)_{\theta=60}$$

となります。$Z(X)_{\theta}= \tan\theta\cdot X$、$Z(X)_{\theta=60}=\tan60\cdot X$ なので、

$$g_{\theta}=\tan\theta / \tan60$$

です。つまり、合成角度θは線量比がわかれば求めることができます。逆に、治療計画として合成角度θを得るためには線量比を求める必要があるということになります。

2. 線量比から MU 比の算出

ウェッジ角度の定義を前述しておりますが、XiO の場合の定義は少々異なります。実際の計画の処方点（Weight Point）で線量比を考えます。つまり、Weight Point にて合成角度を定義していることになります。このため、Weight Point の位置や、患者データが異なれば、線量比からの MU 計算がその都度必要になります。

Weight Point におけるウェッジ線量の割合は

$$\frac{D_{wedge}}{D_{open}+D_{wedge}}=\frac{\tan\theta}{\tan 60}=g_{\theta}$$

です。投与線量 D_{total}[cGy]はわかっていますので、tanθが決まれば D_{wedge}[cGy]と D_{open}[cGy]は決定します。
次に MU に直すためには、Weight Point における 1MU あたりのオープン線量 D'_{open}[cGy/MU]、ウェッジ線量 D'_{wedge}[cGy/MU]が必要になります。これを別途求めれば、

$$MU_{total}=MU_{open}+MU_{wedge}=\frac{D_{open}}{D'_{open}}+\frac{D_{wedge}}{D'_{wedge}}$$

となります。

【XiO の手計算例】
XiO の Wedge Factor は Weight Point の位置によって、その値を変えています。その考え方については、「XiO Inside」のビーム硬化の取扱と Source Index の解説がありますので、あわせてご覧ください。
(1) SSD=90cm, 10x10, 処方点が中心軸上 10cm 深, 角度 30 度,一回処方 100cGy
登録値が以下のようになっていたとします。
Dose Calibration Rate=0.781[cGy/MU]
WF(10x10,10cm) =0.205/0.781=0.2625

まず、線量比を求めます。
D_{wedge}=(tan30/tan60)×(D_{total})=(tan(0.5236)/tan(1.0472))×100=33.3[cGy]
D_{open}=(D_{total})-(D_{wedge})=66.7[cGy]

次に、線量から MU を求めます。

$MU_{open}=D_{open}/(\text{Dose Calibration Rate})=66.7/0.781=85.4[MU]$
$MU_{wedge}=D_{wedge}/((\text{Dose Calibration Rate})\times WF(10x10))=162.6[MU]$
$MU_{total}=248.0[MU]$

(2) SSD=90cm, 20x20, 処方点が中心軸上 10cm 深, 角度 20 度,一回処方 100cGy
まず、線量比を求めます。
$D_{wedge}=(\tan 20/\tan 60)\times(D_{total})=(\tan(0.3491)/\tan(1.0472))\times 100=21.0[cGy]$
$D_{open}=(D_{total})-(D_{wedge})=79.0[cGy]$

次に処方点における 1MU あたりの線量を手計算で求めますが、XiO の Source Index の値を利用して計算することもできます。
WF=0.270
$TPRxPSCF/PSCF(0)_{blk}=1.425$
PSCF(0)/PSCF(ec)=0.750/1.064
Output=0.855
SCD/SWD=100.0/100.0

$D'_{open}=(Output)\times(PSCF(0)/PSCF(ec))\times TPRxPSCF/PSCF(0)_{blk}\times(SCD/SWD)^2$
$=0.855\times 0.750/1.064\times 1.425\times(100.0/100.0)^2$
$=0.859[cGy/MU]$
$D'_{wedge}=(Output)\times(PSCF(0)/PSCF(ec))\times TPRxPSCF/PSCF(0)_{blk}\times(SCD/SWD)^2\times WF$
$=0.855\times 0.750/1.064\times 1.425\times(100.0/100.0)^2\times 0.270$
$=0.232[cGy/MU]$
次に、線量から MU を求めます。
$MU_{open}=D_{open}/D'_{open}=79.0/0.859=92.0[MU]$
$MU_{wedge}=D_{wedge}/D'_{wedge}=21.0/0.232=90.6[MU]$
$MU_{total}=182.6[MU]$
XiO の値を使っているのに一致しない理由は、内部で小数第 4 位以下の数値も処理しているためです。

【ウェッジの線量検証について】
治療計画装置によりウェッジの MU 計算は様々です。治療計画装置の計算精度の確認をする場合は、必ず、プランを作成し、そのプランを使って照射しましょう。

【等線量曲線の角度評価について】
前述のウェッジの角度定義からフィルムを使って実際の角度を（例えば分度器を使って）評価することができます。しかし、ウェッジの等線量曲線を角度評価すると 60 度にならないことがあります。この理由はヘッドに内装されているウェッジを共通に使いますので、エネルギーや照射野サイズ、フィルターの組み合わせにより等線量曲線が変わってしまうからです。

治療機に内装されているウェッジが厳密に 60 度でない場合でも、治療計画の最大ウェッジ角度は 60 度と表示されます。表示角度と評価測定による角度が微妙に一致しないものの、それぞれのエネルギー、照射野において、オープン照射とウェッジ照射の測定データを元にモデル化していますので、ウェッジのみの等線量曲線の計算や合成角度の等線量曲線の合成自体は正しく行います。つまり、Monaco が算出する等線量曲線とフィルムの測定を比較すれば一致することがわかるはずです。

さて、線量計算に問題なくとも、実際の合成角度がどうなるか予想したい場合は以下のようにして求めることができます。例えば、物理ウェッジの角度が 58 度だったとし、Monaco 上の合成角度を θ、実際の合成角度をφとします。

$$\frac{\tan\varphi}{\tan 58}=\frac{\tan\theta}{\tan 60} \Rightarrow \tan\varphi=\tan\theta\cdot\left(\frac{\tan 58}{\tan 60}\right)=0.924\times\tan\theta$$

θが 30 度ならばφは 28.1 度です。